

УДК 621.396.96

Д.В. Молчанов, В.О. Василюк, О.І. Сухаревський

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЯННЯ НАДВОДНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ

У роботі розглядається метод оцінювання характеристик розсіяння надводних об'єктів з урахуванням відбиття від водної поверхні. На основі запропонованого методу виконаний розрахунок характеристик розсіяння корабля при різних станах морської поверхні.

**Ключові слова:** характеристики розсіяння, надводні радіолокаційні об'єкти.

### Вступ

Отримання радіолокаційної інформації про радіолокаційні об'єкти за допомогою проведення натурних і фізичних експериментів пов'язано зі значними матеріальними, організаційними і часовими витратами. Тому в якості найбільш доступного способу отримання інформації про характеристики розсіяння можна розглядати метод математичного моделювання. Класичні асимптотичні методи високо-частотної дифракції не дозволяють без належних узагальнень і удосконалень розраховувати характеристики розсіяння з урахуванням таких факторів, як складність поверхні об'єкта, наявність зламів поверхні, вплив підстилюючої поверхні, можливість рознесення прийому. У зв'язку з цим отримання характеристик розсіяння реальних надводних об'єктів вимагає розвитку теорії електромагнітного розсіяння та створення узагальнених методів розрахунку радіолокаційних характеристик для об'єктів складної форми з неідеально відбиваючою поверхнею.

**Мета роботи** – отримання характеристик розсіяння надводних об'єктів з урахуванням впливу та стану морської поверхні.

### Розрахунок характеристик розсіяння надводного об'єкта

Для обліку відбитої хвилі від підстилюючої поверхні із заданими електромагнітними характеристиками були використані підходи, розглянуті в роботах [1 - 5]. Узагальнюючи ці підходи можна виділити чотири головні шляхи розповсюдження електромагнітних хвиль в системі, яка розглядається: "передавач-об'єкт-приймач", "передавач-об'єкт-море-приймач", "передавач-море-об'єкт-приймач", "передавач-море-об'єкт-море-приймач" (рис. 1). Багаторазовими перевідбиваннями, як ефектами другого порядку малості, пропонується знехтувати.

При опроміненні надводного об'єкту електромагнітною хвилею на поверхні об'єкту виникають дві взаємно-пересічні освітлені області. Одна створюється прямою хвилею, яка падає з точки опромі-

нювання, інша - хвилею, яка відбита від водної поверхні. Обидві хвилі розсіюються по-різному поверхнями двох видів: гладкими і кромочними (зломми). Результуюче відбите поле можна одержати як суму полів, розсіяних гладкими ділянками і ділянками кромки.

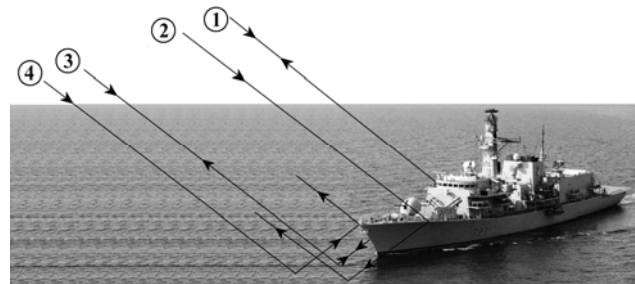


Рис. 1. Шляхи поширення електромагнітних хвиль при опроміненні надводного об'єкта

Для розрахунку припускаємо, що плоска хвиля падає похило на межу розділу середовищ D (рис. 2).

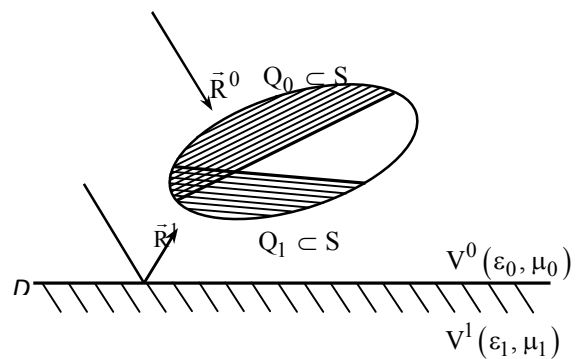


Рис. 2. Система "об'єкт-водна поверхня"

Відбите поле в напрямку  $-\vec{R}^0$  можна прийняти рівним нулю. Таким чином, вираз для поля над поверхнею D при відсутності розсіювача S можна записати у вигляді:

$$\vec{E}(\vec{x} | \vec{R}^0, \vec{p}) = k_0^2 \omega \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \cdot \Omega(k_0 r) \times \left[ \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) + \vec{p}^1 \exp(jk_0(\vec{R}^1 \cdot \vec{x})) \right]. \quad (1)$$

де  $\vec{R}^1 = \vec{R}^0 - 2\vec{n}(\vec{R}^0 \cdot \vec{n})$  – напрям поширення відбитої від площини D хвилі,  $\vec{p}^1$  – векторний коефіцієнт відбиття від підстилаючої поверхні, що розраховується за методикою, наведеною в [6].

В результаті, поверхня S опромінюється, поперше, первинною плоскою хвилею, що розповсюджується в напрямку  $\vec{R}^0$  и, по-друге, хвилею, яка перевідбита площиною D.

З урахуванням фазових набігів, викликаних відбиттям первинної хвилі від площини D, повне поле в точці  $\vec{x}$  поверхні об'єкту S, можна переписати у вигляді

$$\vec{E}(\vec{x} | \vec{R}^0, \vec{p}) = k_0^2 \omega \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \cdot \Omega(k_0 r) \times \left[ \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) + \vec{R}^1 \cdot \vec{x} + \vec{p}^1 \exp(jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a})) \right] \quad (2)$$

Тоді з (1) отримуємо

$$\vec{p} \cdot \vec{E}(\vec{R}^0) = -j\Omega(k_0 r) k_0^2 \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \times \int_S \left[ \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) + \vec{R}^1 \cdot \vec{x} \vec{p}^1 + \exp(jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a})) \right] \vec{H}^\perp(\vec{x}) dS \quad (3)$$

На поверхні об'єкта локалізуються дві взаємно-пересічні (у загальному випадку) "освітлені" області  $Q_0$  и  $Q_1$  (рис. 2). У наближенні фізичної оптики щільність поверхневого струму на гладкій частини поверхні S можна представити у вигляді:

$$\vec{H}^\perp(\vec{x}) = \begin{cases} 2\vec{n}_S \times \vec{H}_1^0, & \vec{x} \in Q_0, \\ 2\vec{n}_S \times \vec{H}_2^0, & \vec{x} \in Q_1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{де } \vec{H}_1^0 = (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})), \vec{H}_2^0 = (\vec{R}^1 \times \vec{p}^1) \times \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \exp(jk_0(\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a}) \exp(jk_0(\vec{R}^1 \cdot \vec{x})). \quad (5)$$

Таким чином, праву частину (3) можна представити у вигляді суми чотирьох інтегралів виду

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int_Q f(\vec{x}) \exp(jk_0 \Theta(\vec{x})) dS : \vec{p} \cdot \vec{E}(\vec{R}^0) = \\ &= -jk_0 \times \frac{\exp(jk_0 r)}{2\pi r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left\{ \int_{Q_0} \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) \times \right. \\ &\times \left( \vec{n}_S \times (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \right) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) dS + \\ &+ \int_{Q_0} \vec{p}^1 \exp(jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a} + \vec{R}^1 \cdot \vec{x})) \times \\ &\times \left( \vec{n}_S \times (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \right) \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) dS + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \int_{Q_1} \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})) \cdot (\vec{n}_S \times (\vec{R}^1 \times \vec{p}^1)) \cdot \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \times \\ &\times \exp(jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a} + \vec{R}^1 \cdot \vec{x})) dS + \int_{Q_1} \vec{p}^1 \times \\ &\times (\vec{n}_S \times (\vec{R}^1 \times \vec{p}^1)) \exp(jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a} + \vec{R}^1 \cdot \vec{x})) \times \\ &\times \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \exp(jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{a} + \vec{R}^1 \cdot \vec{x})) dS \left. \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

При цьому інтегрування для перших двох інтегралів проводиться по "освітленій" області  $Q_0$ , а для двох інших інтегралів - по "освітленій" області  $Q_1$ .

Функції, які відповідають  $f(\vec{x})$  и  $\Theta(\vec{x})$ , в кожному інтегралі, є повільно змінними. Підінтегральні функції в виразі (6) є швидкоосцилюючими і вимагають застосування спеціальних кубатурних формул [7].

Морська поверхня може мати нерівності і шорсткості, викликані вітром і хвилями. Для їх обліку необхідно застосувати деякий усереднений коефіцієнт відбиття. Цей коефіцієнт може бути отриманий [8] множенням коефіцієнта відбиття від гладкої поверхні на  $\exp(-2(k_0 \sigma \cos \theta)^2)$ , де  $k_0$  хвильове число у вільному просторі,  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення висоти шорсткості,  $\theta$  - кут падіння хвилі для плоскої усередненої морської поверхні.

### Розрахунок перевідбиття від гладких частин поверхні об'єкту

У ході розрахунків характеристик розсіяння гладкі частини поверхні об'єктів розбиваються на трикутні фацети з урахуванням геометрії об'єкта.

Для кожної і-ої фацети k-го елемента поверхні об'єкта знаходиться нормаль  $\vec{n}$  і напрямок дзеркального відображення  $\vec{R}^1$ , який відповідає напрямку  $\vec{R}^0$  плоскої хвилі, яка падає на фацету. З кожної вершини і-ої фацети проводяться промені з направляючим ортом  $\vec{R}^1$  для пошуку перетину променів відбиву з іншими елементами поверхні об'єкту. Якщо відбувається перетин всіх трьох променів з одним елементом поверхні, на цьому m-му елементі формується j-а фацета з вершинами в точках перетину поверхні m-го елемента і двох променів із направляючим ортом  $\vec{R}^1$ , які проведені з вершин і-ої фацети. В якості додаткового падаючого поля, що приходить з напрямку  $\vec{R}^1$ , для j-ої фацети береться перевідбита плоска хвиля з комплексним вектором поляризації  $\vec{p}^1$ , якій отримано за допомогою наближення Кірхгофа для і-ої фацети. Також додаткове поле, яке падає на j-ну фацету, має додатковий набіг фази, пов'язаний з перевідбиттям від і-ої фацети. Додатковий набіг фази визначається аналогічно з

ситуацією набігу фази при визначенні поля, яке падає на надводний об'єкт при перевідбитті електромагнітної хвилі від підстилаючої поверхні (2). Поле, яке розсіяне  $j$ -ою фазетою в напрямку прийому  $\vec{r}^0$ , з урахуванням додаткової падаючої хвилі з напрямку  $\vec{R}^1$  розраховується за допомогою наближення фізичної оптики. Алгоритм подальшого перевідбиття може бути повторений з метою врахування багатовимірних перевідбиттів.

### Розсіяння на кромочних локальних ділянках поверхні об'єкта

Вираз для поля, яке розсіяне кромочною локальною ділянкою можна представити у вигляді [9]

$$\vec{p} \cdot \vec{E}_{S_0} = -jk_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} (\vec{p} \cdot \vec{F}(\vec{r}^0)), \quad \vec{F}(\vec{r}^0) = \int_{S_0} \left[ \vec{H}^\perp - \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{E}^\perp \times \vec{r}^0) \right] \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS. \quad (7)$$

В якості поверхні інтегрування  $S_0$  вибирається тороїдальна поверхня, яка "натягнута" на кромку.

Обчислення  $\vec{F}(\vec{r}^0)$  може бути зведено до обчислення одновимірного інтегралу

$$\vec{F}(\vec{r}^0) = \vec{D}_0 \exp(jk_0 l) \int_{\alpha}^{\beta} \exp(jk_0 q t) dt = \vec{D}_0 \exp(jk_0 l) \times \frac{\exp(jk_0 q \alpha)}{jk_0 q} (\exp(jk_0 q (\beta - \alpha)) - 1). \quad (8)$$

Вирази (7) і (8) дозволяють обчислити поле, яке розсіяне прямолінійними кромочними локальними ділянками розсіяння.

### Результати розрахунків

В якості прикладу розглянемо характеристики розсіяння моделі корабля, зображеної на рис. 3. Будемо вважати, що модель має такі розміри: довжина – 20,5 м, ширина – 4,4 м, висота – 6,6 м.

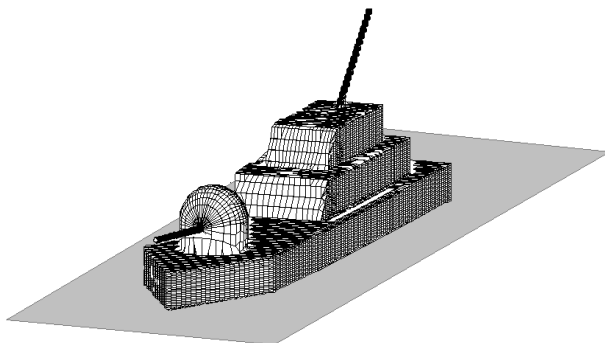


Рис. 3. Модель надводного об'єкта на морській поверхні

При обчисленнях характеристик розсіяння моделі був прийнятий кут місця опромінення  $20^\circ$ . Частота опромінення 10 ГГц - довжина хвилі – 3 см.

Крок зміни азимута  $1^\circ$ , азимут  $\beta$  відкладено проти годинникової стрілки від носового напрямку ( $0^\circ$  відповідає опромінюванню в ніс,  $180^\circ$  відповідає опроміненню з корми).

Чисельні результати отримані при суміщеному прийомі на двох поляризаціях зондуючого сигналу: горизонтальна поляризація (вектор напруженості електричного поля падаючої хвилі  $\vec{p}_r^0$  паралельний підстилаючої поверхні), та вертикальна (вектор напруженості електричного поля падаючої хвилі  $\vec{p}_v^0$  ортогональний  $\vec{p}_r^0$  і лежить в площині, перпендикулярній підстилаючої поверхні і проходить через вектор напрямку падаючої плоскої хвилі).

Представлені чисельні результати отримані для двох типів морської поверхні: гладка морська поверхня ( $\epsilon' = 80 + j \cdot 3,4$ ) та бурхливе море з тими ж електродинамічними параметрами, але яке має такі неоднорідності поверхні, що коефіцієнт відбиття від морської поверхні у дзеркальному напрямку наближається до нуля. Відносна магнітна проникність обох типів морської поверхні дорівнює одиниці.

На рис. 4 показана кругова діаграма ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) моделі корабля при гладкому морі і горизонтальній поляризації.

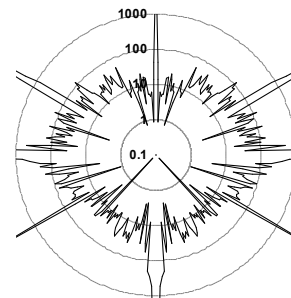


Рис. 4. Кругова діаграма ЕПР моделі корабля при гладкому морі і горизонтальній поляризації

Кругова середня ЕПР моделі корабля дорівнює  $28471 \text{ м}^2$ . Кругова медіанна ЕПР (величина ЕПР, яка може використовуватися для розрахунку дальності виявлення об'єкту з вірогідністю 0.5) дорівнює  $24 \text{ м}^2$ . Аналогічна кругова діаграма ЕПР для вертикальної поляризації наведена на рис. 5.

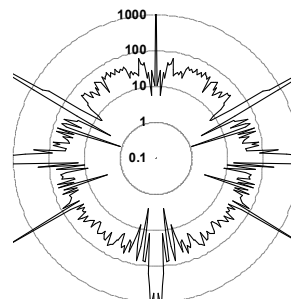


Рис. 5. Кругова діаграма ЕПР моделі корабля при гладкому морі і вертикальній поляризації

Кругова середня ЕПР моделі корабля дорівнює  $14736 \text{ м}^2$ . Кругова медіанна ЕПР дорівнює  $40 \text{ м}^2$ . На рис. 6 показана кругова діаграма ЕПР моделі корабля при бурхливому морі і горизонтальній поляризації.

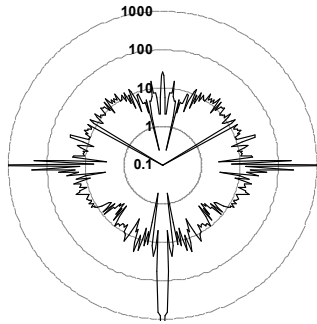


Рис. 6. Кругова діаграма ЕПР моделі корабля при бурхливому морі і горизонтальній поляризації

Кругова середня ЕПР моделі корабля дорівнює  $1027 \text{ м}^2$ . Кругова медіанна ЕПР дорівнює  $11 \text{ м}^2$ . Аналогічна кругова діаграма ЕПР для вертикальної поляризації наведена на рис. 7.

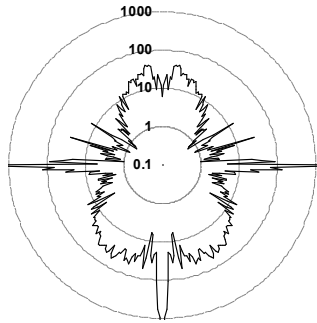


Рис. 7. Кругова діаграма ЕПР моделі корабля при бурхливому морі і вертикальній поляризації

Кругова середня ЕПР моделі корабля дорівнює  $1039 \text{ м}^2$ . Кругова медіанна ЕПР дорівнює  $12 \text{ м}^2$ .

Отримані результати показують, що гладке море істотно збільшує ЕПР надводного об'єкта за порівняння з ЕПР корабля у бурхливому морі. При цьому абсолютні значення ЕПР для гладкого моря при горизонтальній поляризації трохи вище, ніж при вертикальній. У разі бурхливого моря поляризація зондуючого сигналу не впливає суттєво на характеристики розсіяння надводного об'єкту.

#### МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙНИЯ НАДВОДНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.В. Молчанов, В.А. Василец, О.И. Сухаревский

*В работе рассматривается подход к оцениванию характеристик рассеяния надводных объектов с учетом отражения от водной поверхности. На основе предложенного подхода выполнен расчет характеристик рассеяния модели корабля при различных состояниях морской поверхности.*

**Ключевые слова:** характеристики рассеяния, надводные радиолокационные объекты.

#### CALCULATION METHOD FOR SCATTERING CHARACTERISTICS OF ABOVE-WATER RADAR OBJECTS

D.V. Molchanov, V.A. Vasilets, O.I. Sukharevsky

*The paper deals with an approach to the evaluation of the scattering characteristics for above-water objects, taking into account the reflection from the water surface. On the basis of the proposed approach calculated the scattering characteristics of the ship model for the different states of the sea surface.*

**Keywords:** scattering characteristics, above-water radar objects.

## Висновки

Запропонований у статті підхід дозволяє розраховувати вторинне випромінювання надводних об'єктів складної форми з урахуванням хвилі, яка відбита від водної поверхні. При цьому розглянути два типи поверхонь об'єкту, що розсіюють: гладкі та кромочні. На основі отриманих формул виконано розрахунок ефективної поверхні розсіяння надводної цілі.

## Список літератури

1. Рассеяние импульсного сигнала на идеально проводящем объекте, расположенном вблизи границы раздела сред / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.А. Горельшев, А.Ю. Шрамков // *Збірник наукових праць ХВУ*. – Х.: ХВУ, 1998. – Вип. 16. – С. 78-85.
2. Sukharevsky O.I., Gorelyshev S.A., Vasilets V.A., Muzychenko A.V. (1998) Pulse Signal Inverse Scattering by Perfectly Conducting Object Located near Uniform Half-Space. *Radio Physics and Radio Astronomy*, Vol. 3, No. 2. – P. 136–145.
3. Sukharevsky O.I., Vasilets V.A., Gorelyshev S.A., Muzychenko A.V. (2000). Pulse Signal Scattering from Perfectly Conducting Complex Object Located near Uniform Half-Space. *Progress in Electromagnetic Research, PIER* 29, No. 29. – P 169–185.
4. Василец В.А. Методика расчета ЭПР идеально проводящего наземного объекта / В.А. Василец // *Збірник наукових праць ХВУ*. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 7(37). – С. 90-92.
5. Метод расчета ЭПР наземного объекта с неидеально отражающей поверхностью / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, А.З. Сазонов, К.И. Ткачук // *Рассеяние электромагнитных волн*. – Таганрог: ТГРУ, 2003. – Вып. 12. – С. 9-15.
6. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Ю.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшина. – Х.: Крок, 2000. – 344 с.
7. Сухаревский И.В. Дополнительные разделы высшей математики. Вып.5. Квадратурные и кубатурные формулы (классика и новые разработки) / И.В. Сухаревский, Е.Н. Семеняка. – Х.: ХВУ, 1999. – 105 с.
8. Семенов А. Теория электромагнитных волн / А. Семенов. – М.: МГУ, 1968. – 322 с.
9. *Electromagnetic wave scattering by aerial and ground radar objects*. Edited by Oleg I. Sukharevsky. – CRC Press. Boca Raton, London, NY, 2014. – 337 p.

Надійшла до редакції 5.01.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук ст. наук. співр. В.К. Іванов, Інститут радіофізики та електроніки НАН України, Харків.